unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Willian Mikio Doi

Avaliação de lubrificantes para aplicação em componentes mecânicos pelo método de compressão do anel

Guaratinguetá

2015

WILLIAN MIKIO DOI

AVALIAÇÃO DE LUBRIFICANTES PARA APLICAÇÃO EM COMPONENTES MECÂNICOS PELO MÉTODO DE COMPRESSÃO DO ANEL

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

Guaratinguetá

2015

Doi, Willian Mikio
D657a Avaliação de lubrificantes para aplicação em componentes mecânicos pelo método de compressão do anel / Willian Mikio Doi – Guaratinguetá, 2015.
61 f. : il.
Bibliografia : f. 59-61

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.
Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

1. Lubrificação e lubrificantes I. Título

CDU 621.892

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

Willian Mikio Doi

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. MARCELINO P. DO NASCIMENTO
UNESP-FEG

Prof. Dr. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP-FEG

Janeiro de 2016

DADOS CURRICULARES

WILLIAN MIKIO DOI

NASCIMENTO	24.10.1987 - SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Fernando Doi Emilia Katsue Kuabara
2008/2015	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

Dedico este trabalho aos meus pais, minhas tias, à minha namorada, e a todos que me ajudaram e acreditaram no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, *Emilia Kuabara* e *Fernando Doi*, por sempre me darem suporte e apoio em todas as minhas decisões. Às minhas tias, *Maria Kuabara*, *Rosa Kuabara*, *Regina Kuabara* e *Izabel Kuabara*, por estarem sempre dispostas a me orientar e ajudar em todos os momentos da minha vida.

Aos meus avós, por me incentivarem a me esforçar ao máximo para atingir meus objetivos.

Ao meu irmão, *Wilton Doi*, por ser um exemplo de um bom engenheiro.

Aos meus grandes amigos de república, *Pablo Gilberto Fini, Vinicius Rorato, Filipe Bortolin, Cristiano Watanabe, Jader Pechoto* e *Kaio Max*, que me ajudaram a estudar e também proporcionaram muitos momentos de alegria.

À *Cíntia Suzuki*, minha namorada e companheira, pelo seu carinho, apoio e compreensão nesses quatro anos de namoro.

Ao Prof. Dr. *Angelo Caporalli Filho* por sua dedicação em me orientar no Trabalho de Graduação, sempre disposto a me ajudar e ensinar.

À equipe "*Piratas do Vale*" de Baja SAE por me apresentarem esta proposta de trabalho de graduação e em especial ao atual capitão, *Lucas Reis*, pelo total suporte no fornecimento de material e informações técnicas.

Aos técnicos que me ajudaram a realizar os ensaios necessários deste trabalho.

À todos os professores que fizeram parte de minha graduação por todo o aprendizado que me proporcionaram.

Aos meus melhores amigos que sempre acreditaram em mim.

E agradeço a Deus por todas as oportunidades, realizações e conquistas.

“Revelemo-nos, mais por atos do que por palavras, dignos de possuir este grande país”

Theodomiro Carneiro Santiago

DOI, W. M. **Avaliação de Lubrificantes para aplicação em componentes mecânicos pelo método de compressão do anel.** 2016. 61 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Os lubrificantes atuais estão cada vez melhores com o avanço da tecnologia e mais específicos para cada caso de sua aplicação. Seu uso está diretamente ligado ao nível de desgaste gerado entre objetos em contato direto, sendo essencial para promover maior durabilidade dos componentes mecânicos. O presente estudo se refere a avaliação comportamental de alguns tipos de lubrificantes, para classificar dentre eles o que apresentará o menor atrito quando utilizado entre componentes metálicos. Para a realização deste trabalho, será utilizado o método do ensaio de compressão dos anéis, e após realizado os ensaios e analisados os resultados, será possível relatar qual lubrificante apresentou o melhor comportamento sob condições de atrito. A necessidade deste trabalho se deu inicialmente pela observação de que alguns projetos mecânicos desenvolvidos na FEG não tiveram qualquer estudo desenvolvido sobre os lubrificantes utilizados. Assim este estudo objetiva fornecer um melhor suporte a esses projetos. Neste trabalho foram utilizados cinco lubrificantes diferentes, sendo três óleos e duas graxas.

PALAVRAS-CHAVE: Lubrificantes. Ensaio de compressão do anel. Atrito. Transmissão.

DOI, W. M. **Lubricants evaluation for application in mechanical componentes by the ring compression test.** 2016. 61 p. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

The current lubricants are getting better with advancing technology and more specific to each case of application. Its use is directly linked to the level of waste by friction generated between objects in direct contact and it is essential to promote greater durability of mechanical components. This study refers to behavioral assessment of some types of lubricants and rank among them which one presents the lowest friction between metal components. For this work, will be used the method of ring compression test (RCT), after performed tests and analyzed the results, will be possible to report which lubricant will bring the best reduction in friction. The need for this work was given initially by the observation that some mechanical projects developed at FEG does not conduct in-depth studies the lubricants used. Therefore this study aims to provide better support to these projects. In this work were used five different lubricants, three oils and two greases.

KEYWORDS: Lubricants. Ring compression test. Friction. Drivetrain.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: DESENHO ESQUEMÁTICO DOS QUATRO MODOS REPRESENTATIVOS DE DESGASTE. 20

FIGURA 2: IMAGEM DE COMPUTADOR MOSTRANDO ÁTOMOS DE OURO (EMBAIXO) ADERENTE À PONTA FINA DE UMA SONDA DE NÍQUEL (EM CIMA) QUE FOI COLOCADA EM CONTATO COM A SUPERFÍCIE DE OURO. 21

FIGURA 3: MECANISMO RESPONSÁVEL PELA FORÇA DE ATRITO CINÉTICO 22

FIGURA 4: ATRITO POR CISALHAMENTO DOS PICOS DE RUGOSIDADE 23

FIGURA 5: ATRITO POR ADESÃO DAS ÁREAS DE CONTATO 24

FIGURA 6: ENSAIO DE COMPRESSÃO DO ANEL: (A) BAIXO ATRITO; (B) ALTO ATRITO 26

FIGURA 7: CORPO DE PROVA PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO EM DIFERENTES SITUAÇÕES (A) NÃO-DEFORMADO (B) DEFORMADO EM CONDIÇÃO DE BAIXO ATRITO (C) DEFORMADO EM CONDIÇÃO DE ALTO ATRITO 28

FIGURA 8: GEOMETRIA PROPOSTA PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO DE ATRITO EM CONDIÇÕES DE BAIXOS NÍVEIS DE PRESSÃO NORMAL 30

FIGURA 9: ELEMENTOS DE UMA CAIXA DE TRANSMISSÃO 30

FIGURA 10: VISÃO EXPANDIDA DO CONJUNTO MOTOR E TRANSMISSÃO 31

FIGURA 11: CAIXA DE TRANSMISSÃO UTILIZADA PELO VEÍCULO BAJA SAE DA UNESP/FEG 31

FIGURA 12: VISÃO EXPLODIDA DA CAIXA DE DIREÇÃO UTILIZADA PELO VEÍCULO BAJA DA UNESP/FEG 38

FIGURA 13: SISTEMA PINHÃO/CREMALHEIRA 38

FIGURA 14: MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE RA 40

FIGURA 15: MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE RT 40

FIGURA 16: MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RUGOSDADE RSM 40

FIGURA 17: MÉTODO DE MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE RΔQ 41

FIGURA 18: MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS MOHR E FEDERHAFF 42

FIGURA 19: TORNO HBX IMOR 42

FIGURA 20: ELETROEROSÃO CNC DE CORTE A FIO AGIE CHARMILLES 43

FIGURA 21: MÁQUINA DE POLIR KNUTH ROTOR 43

FIGURA 22: RUGOSÍMETRO MARSURF M300 44

FIGURA 23: PAQUÍMETRO DIGITAL MITUTOYO 44

FIGURA 24: PROJETOR DE PERFIL MP 320 CARL ZEISS 45

FIGURA 25: A- CORPO DE PROVA NÃO POLIDO; B- CORPO DE PROVA POLIDO COM LIXA 600 46

FIGURA 26: EXEMPLO DO ANEL UTILIZADO NO ENSAIO..... 50

FIGURA 27: TODAS AS AMOSTRAS APÓS OS ENSAIOS..... 53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 4340 32

TABELA 2: PROPRIEDADES FÍSICAS DO AÇO SAE 4340 33

TABELA 3: PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AÇO SAE 4340 33

TABELA 4: OUTRAS DESIGNAÇÕES DO AÇO SAE 4340 33

TABELA 5: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO SAE 8620 34

TABELA 6: PROPRIEDADE FÍSICA DO AÇO SAE 8620 34

TABELA 7: PROPRIEDADE TÉRMICA DO AÇO SAE 8620 34

TABELA 8: OUTRAS DESIGNAÇÕES DO AÇO SAE 8620 35

TABELA 9: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ALUMÍNIO 7075 36

TABELA 10: PROPRIEDADES FÍSICAS DO ALUMÍNIO 7075 36

TABELA 11: PROPRIEDADES TÉRMICAS DO ALUMÍNIO 7075 36

TABELA 12: OUTRAS DESIGNAÇÕES DO ALUMÍNIO 7075 37

TABELA 13: RUGOSIDADES DOS CORPOS DE PROVA. 53

TABELA 14: MEDIDAS DOS DIÂMETROS INTERNOS (DI) E ESPESSURAS (H) APÓS OS ENSAIOS 54

TABELA 15: REDUÇÃO EM PORCENTAGEM DOS DIÂMETROS INTERNOS (DI) E ESPESSURAS (H) APÓS OS ENSAIOS 55

TABELA 16: AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS LUBRIFICANTES ATRAVÉS DAS REDUÇÕES MÉDIAS 56

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: CURVAS DE CALIBRAÇÃO DESENVOLVIDAS POR MALE PARA DETERMINAR O ATRITO 27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI- American Iron and Steel Institute

API- American Petroleum Institute

FEG- Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

FISPQ - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

GM- General Motors

SAE- Society of Automotive Engineers

UNESP- Universidade Estadual Paulista

UNS- Unifield Numbering System

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS. 16

1.2 OBJETIVOS 17

1.2.1 Objetivos Específicos **17**

1.3 JUSTIFICATIVA 17

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19

2.1 TRIBOLOGIA 19

2.1.1 Atrito **20**

2.1.2 Lubrificação e lubrificantes **24**

2.1.3 Desgaste **25**

2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DO ANEL 26

2.3 CAIXA DE TRANSMISSÃO 30

2.3.1 Materiais usualmente utilizados na caixa de transmissão **32**

2.3.1.1 Aço SAE 4340 – (Eixos) 32

2.3.1.2 Aço 8620 – (Engrenagens) 33

2.3.1.3 Alumínio 7075 – (Garfo seletor de relação e caixa da transmissão) 35

2.4 CAIXA DE DIREÇÃO AUTOMOTIVA - PINHÃO/CREMALHEIRA 37

2.5 RUGOSIDADE 39

3 MATERIAIS E MÉTODOS 42

3.1 MATERIAIS 46

3.1.1 Lubrificante A (Óleo Lubrax TRM-4 grau 90) **47**

3.1.2 Lubrificante B (Óleo Valvoline Dexron VI) **47**

3.1.3 Lubrificante C (Óleo Valvoline Dexron III) **48**

3.1.4 Lubrificante D (Graxa Azul de Lítio) **49**

3.1.5 Lubrificante E (Graxa Branca de Lítio) **49**

3.2 MÉTODOS 50

3.2.1 Preparação dos corpos de prova **50**

3.2.2 Ensaio de compressão do anel **50**

3.2.3 Medições das rugosidades e dos diâmetros interno dos corpos de prova após os ensaios..... 51

3.2.4 Cálculo das porcentagens de redução..... 51

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 52

4.1 DIMENSÕES OBTIDAS..... 53

4.1.1 Rugosidade..... 53

4.1.2 Tabelas de medidas e cálculos após os ensaios..... 54

5 CONCLUSÃO 57

REFERÊNCIAS 59

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Segundo Carreteiro (1998), a mais antiga utilização de lubrificação de que se tem notícia foi identificada no Egito, sendo datada de 2600-1700 a.C. no túmulo de Ra-Em-Ka, onde é mostrado um trenó transportando um monumento de pedra e um homem despejando um líquido para lubrificar os deslizadores do trenó.

No início dos primeiros jogos olímpicos realizados na Grécia por volta de 777 a.C – 393 d.C., há outra manifestação de lubrificantes, onde uma das modalidades era a corrida de Bigas, sendo seus eixos lubrificados por gordura animal. Na idade média, essa mesma gordura animal foi utilizada para lubrificar rodas de carruagens até mecanismos de abertura de portões de castelos (BOZZA, s.d.).

Mais tarde, no século XV, o petróleo conhecido como óleo de pedra, antes utilizado somente para fins medicinais, passou a ser utilizado como lubrificante para mecanismos mais complexos. Porém foi no século XX devido à 2ª Guerra Mundial que o lubrificante derivado do petróleo foi utilizado em grandes quantidades. Para reduzir o atrito ao máximo e prolongar a vida útil dos equipamentos para a guerra, novos lubrificantes surgiram (BOZZA, s.d.).

Nos dias atuais os lubrificantes evoluíram muito tecnologicamente, existindo diversos tipos de lubrificantes, de origem mineral, semissintético e sintético, com diferentes tipos de viscosidades e aditivos, específicos para cada situação. Exigindo em alguns casos, de equipamentos de lubrificação para a correta aplicação do lubrificante. Desse modo, a lubrificação é um fator decisivo no poder de competitividade.

Um exemplo da importância da lubrificação no poder de competitividade é o caso de veículos de competição como os de formula 1, seus componentes mecânicos são elevados a condições extremas de trabalho para uma melhor performance, sendo muito importante que os componentes que necessitem de lubrificação, como o motor, sejam lubrificados da melhor forma possível, evitando possíveis desgastes que poderão gerar quebras.

Para o caso do uso de lubrificantes em uma caixa de transmissão, os lubrificantes possuem a responsabilidade de reduzir o atrito gerado e a temperatura entre os dentes das engrenagens, além de permitir expulsão eficiente do filme de óleo para o momento da frenagem do conjunto

sincronizado e de manter os particulados metálicos e não metálicos em suspensão para fora das áreas de contatos dos rolamentos e dentados (GARCIA, 2013).

Os desgastes gerados, torna a escolha do lubrificante muito importante para reduzir o atrito provocado entre os componentes metálicos em contato, prolongando sua vida útil.

O conhecimento da relação do atrito entre materiais metálicos na presença de um lubrificante é de elevada importância para avaliar qual lubrificante será melhor na tarefa de reduzir o atrito, ajudando na elaboração de um projeto de componentes mecânicos que necessitem de lubrificação, visando maior vida útil das peças e consequentemente o aumento de sua confiabilidade. O resultado desta pesquisa será muito importante para o avanço tecnológico necessário de projetos desenvolvidos na UNESP/FEG.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho focaliza um estudo sobre a melhor opção dentre os lubrificantes disponíveis comercialmente, selecionados para a diminuição do atrito gerado entre componentes de uma aplicação mecânica, como no caso de uma caixa de transmissão e uma caixa de direção que gera atrito entre seus componentes mecânicos.

1.2.1 Objetivos Específicos

Será utilizado o ensaio de compressão do anel, nesse ensaio serão utilizados cinco diferentes tipos de lubrificantes e anéis com dois diferentes níveis de rugosidade, com o objetivo de verificar se esta característica do objeto influi neste tipo de avaliação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Durante a graduação foi possível observar diversos projetos mecânicos desenvolvidos na FEG, grande parte destes, possuindo componentes metálicos móveis e em contato constante, gerando aquecimento e desgaste, o que em algumas situações ocasionaram falha e até quebra, como no caso dos componentes mecânico do veículo Baja. O estudo de alguns lubrificantes para a redução do atrito é de fundamental importância para esses projetos, pois assim, será

possível a utilização de determinados tipos de materiais para aplicação mecânica, antes descartados, devido ao elevado desgaste provenientes do elevado atrito entre os componentes mecânicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRIBOLOGIA

Segundo Carreteiro (1998), na década de 1960 na Inglaterra, ocorreu um aumento acentuado do número de falhas mecânicas por conta do desgaste. Isso se deu pelo avanço tecnológico da indústria e uso contínuo de processos de fabricação, gerando paradas inconvenientes para reparar defeitos, o que acarretaria num prejuízo, além de ser prejudicial para a competitividade no mercado.

A tendência de ocorrência dessas falhas foi detectada por especialistas da área de atrito, desgaste e lubrificação, assim estudos começaram a ser desenvolvidos para solucionar esses problemas (CARRETEIRO, 1998).

Alguns anos mais tarde, o governo da Inglaterra constituiu um grupo de trabalho a fim de "investigar o presente estado da educação e pesquisa em lubrificação neste país e dar uma opinião sobre as necessidades da indústria". Foi então que por volta de 1966, este grupo de trabalho, liderado pelo Dr. H. Jost, atribuíram o termo tribologia definida como "ciência e tecnologia de superfícies interativas em movimento relativo e dos assuntos e práticas relacionados" (CARRETEIRO, 1998).

A origem do termo tribologia, vem do grego Tribo (esfregar) e Logos (estudo) (RADI, 2007).

A tribologia engloba os conhecimentos adquiridos na física, na química, na mecânica e na ciência dos materiais, para explicar e prever o comportamento de sistemas físicos que são usados em sistemas mecânicos. Os principais campos de estudos reunidos pela tribologia são os estudos que já existiam anteriormente sobre os fenômenos de lubrificação, atrito e desgaste, estes antecedem 1966 (RADI, 2007).

Segundo Schey (1984), a tribologia é com certeza uma ciência interdisciplinar por tratar dos assuntos de atrito, lubrificação e desgaste.

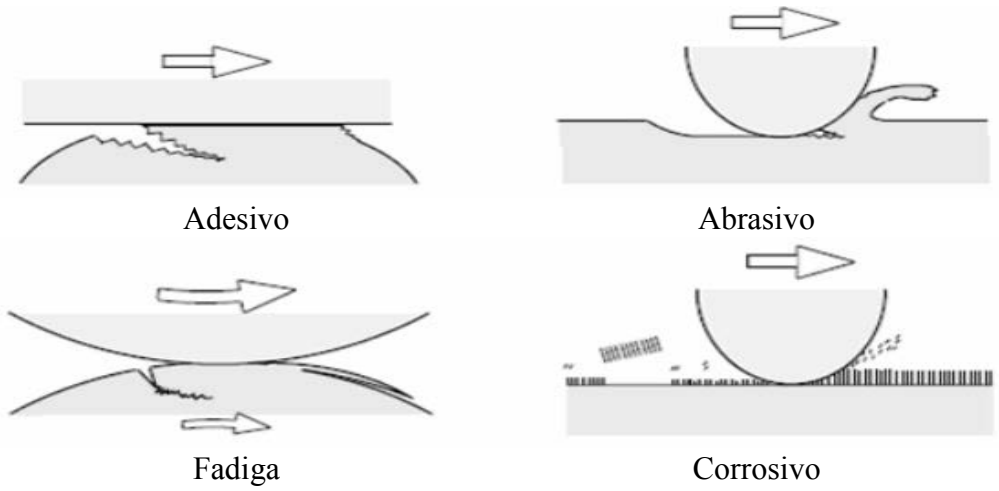
"A definição da norma alemã de atrito, conclui que um dos efeitos do atrito é o desgaste. " (GARCIA, 2013).

H. Jost em 1966 foi o pioneiro nos estudos sobre os impactos econômicos gerados pela aplicação dos conhecimentos da tribologia. E segundo seu relatório, sua estimativa de redução

de gastos era de 20%, quando aplicado os conhecimentos existentes de tribologia sobre as perdas por desgastes (RADI, 2007).

Sendo o desgaste um dos principais focos de estudo da tribologia, de forma a ser classificado em 4 diferentes modos conforme Figura 1:

Figura 1: Desenho esquemático dos quatro modos representativos de desgaste.



Fonte: (RADI, 2007)

Segundo Garcia (2013), no caso de componentes mecânicos de uma caixa de transmissão ou caixa de direção, a tribologia é aplicada nas uniões metálicas com deslizamentos cruzados, rotativos e rolantes. Sendo que o particulado metálico desprendido dos componentes da transmissão, permanece em suspensão no lubrificante.

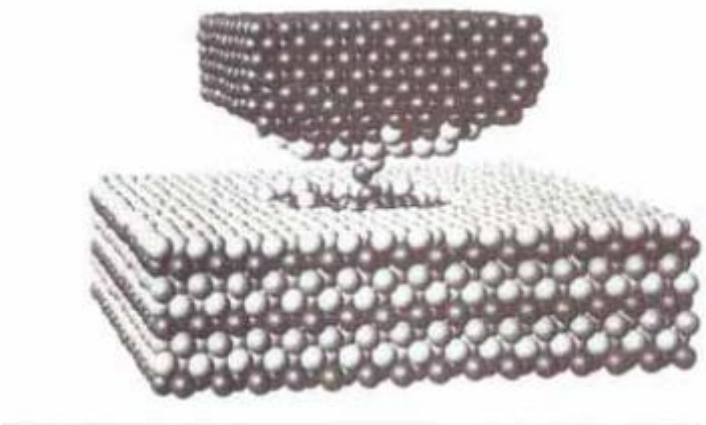
2.1.1 Atrito

Segundo Halliday (2008), a força de atrito é o vetor resultante de muitas forças que atuam entre os átomos superficiais de um corpo e os átomos superficiais de outro corpo que estão em contato. Sendo que, caso duas superfícies metálicas polidas e limpas forem colocadas em contato em alto vácuo, para que continuem limpas, torna-se impossível fazê-las deslizarem, isso ocorre devido ao fato de ambas serem lisas e assim muitos átomos entram em contato entre si e as superfícies se soldam a frio. Mas na maioria dos casos, essas inúmeras interações atômicas não existem, devido ao fato de que mesmo uma superfície metálica altamente polida está longe

de ser uma superfície plana em escala atômica, além de possuírem impurezas como camadas de óxidos.

Segundo Tipler (2009), o atrito possui natureza eletromagnética, que surge da atração entre as moléculas de duas superfícies em contato, podendo ser observada na Figura 2.

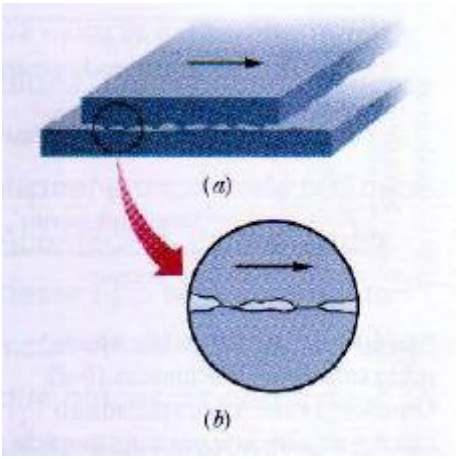
Figura 2: Imagem de computador mostrando átomos de ouro (embaixo) aderente à ponta fina de uma sonda de níquel (em cima) que foi colocada em contato com a superfície de ouro.



Fonte: (TIPLER, 2009).

Quando duas superfícies são colocadas em contato, somente os picos mais salientes se tocam como pode-se observar na Figura 3.

Figura 3: Mecanismo responsável pela força de atrito cinético



Fonte: (HALLIDAY, 2008)

Se uma força aplicada paralela à superfície for suficiente para fazer uma delas deslizar, significa que irá ocorrer a ruptura das soldas e assim iniciará o movimento do objeto, seguindo um processo contínuo de formação e ruptura de novas soldas.

Existem dois tipos de atrito, o estático e o cinético:

O atrito estático (Fe) é a força que atua quando não existe deslizamento entre as duas superfícies em contato. Sua constante de proporcionalidade "μe" é chamada de coeficiente de atrito estático. Já o atrito cinético (Fc) é a força que atua quando as superfícies em contato já estão em movimento, e sua constante de proporcionalidade "μc" é chamada de coeficiente de atrito cinético.

As relações do atrito são dadas pelas equações (1) e (2) a seguir:

$F_e = \mu_e \times P_n$ para atrito estático; (1)

$F_c = \mu_c \times P_n$ para atrito cinético. (2)

Com Pn sendo a força normal à superfície.

Segundo Schey (1984), há a possibilidade de adotar da engenharia mecânica a definição do coeficiente de atrito, conforme a equação (3):

$\frac{F}{P} = \frac{\tau}{p}$; (3)

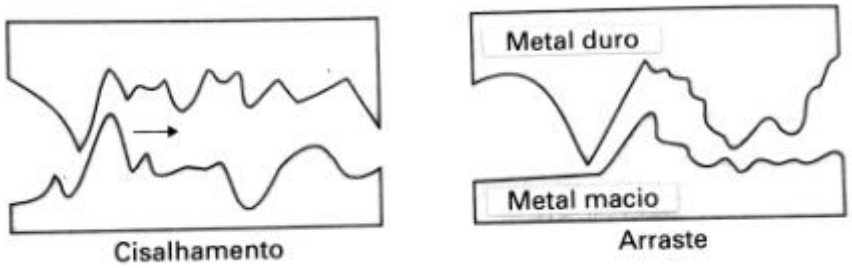
Onde F é a força requerida para mover o objeto, P é a força normal e τ é a tensão média de cisalhamento pelo atrito e p é a pressão normal.

A definição de atrito inclui duas leis básicas de atrito: 1- a força de atrito é proporcional à força normal; 2- é independente do tamanho da área de contato aparente. (SCHEY, 1984)

As superfícies sólidas, mesmo as mais polidas, apresentam asperezas e irregularidades, assim, o modo que as superfícies interagem caracteriza os mecanismos de atrito: sendo por cisalhamento ou por adesão. (CARRETEIRO, 1998)

Atrito por cisalhamento conforme a Figura 4: ocorre quando os picos das duas superfícies entram em contato lateral entre si, assim o atrito se desenvolve pela resistência oferecida pelo sólido à ruptura desses picos. Existem duas situações para este tipo de atrito, a primeira ocorre quando as duas superfícies possuem mesma dureza, assim ocorrerá a ruptura dos picos de ambas as superfícies, a segunda ocorre quando uma superfície é mais dura que a outra, a superfície mais dura irá funcionar como uma ferramenta de corte, cisalhando os picos da outra superfície, gerando mais desgaste na superfície com dureza menor.

Figura 4: Atrito por cisalhamento dos picos de rugosidade



Fonte: (CARRETEIRO, 1998)

Atrito por adesão conforme Figura 5: ocorre quando as superfícies em contato apresentam pequenas áreas relativamente planas ao invés de picos, possibilitando a ocorrência de solta a frio, sendo ela a maior responsável pela resistência ao movimento.

Figura 5: Atrito por adesão das áreas de contato

Fonte: (CARRETEIRO, 1998)

2.1.2 Lubrificação e lubrificantes

A lubrificação pode ser definida como o fenômeno da redução de atrito entre duas superfícies em movimento relativo, por meio da introdução de uma substância entre as mesmas (CARRETEIRO, 1998).

Segundo Porr e Sinatora (2009) "A ação dos lubrificantes segue o seguinte princípio: se um filme de um material com baixa resistência ao cisalhamento pode ser colocado entre duas superfícies, o coeficiente de atrito é diminuído. "

A função principal do lubrificante é possibilitar que o movimento se faça com um mínimo de aquecimento, ruído e desgaste. Sendo possível através da substituição do atrito direto entre as superfícies pelo atrito fluido, que é o deslizamento entre as moléculas do fluido, evitando assim o contato direto entre os dois materiais.

Segundo Porr e Sinatora (2009), os lubrificantes podem ser apresentados principalmente nos estados: sólido, pastoso e líquido. Basicamente existem três tipos de lubrificação que atuam nas condições de atrito na conformação de metais, sendo eles: a seco, hidrodinâmicas e de contorno.

Na condição a seco, a interface peça-ferramenta é isenta de lubrificante, há somente a presença de camadas de óxidos e ocasionais contaminantes. Sendo esta condição a de maior coeficiente de atrito, utilizada apenas em alguns processos como na laminação a quente de chapas e lingotes (PORR e SINATORA, 2009).

Na condição de lubrificação hidrodinâmica, onde a película de óleo separa completamente as superfícies em movimento relativo, há uma camada relativamente espessa de

um fluido lubrificante entre a matriz e a peça. Sendo que as condições de atritos são governadas pela viscosidade do lubrificante, que na maioria dos casos decresce com o aumento da temperatura

Na condição de lubrificação de contorno, é a condição mais usualmente verificada na conformação dos metais, uma vez que elevações na temperatura de interface e pressões relativamente altas impedem a ocorrência de lubrificação hidrodinâmica, embora segundo Altan (1999 apud PORR e SINATORA, 2009), esse tipo de lubrificação não permite uma análise confiável, sendo a maioria de seu conhecimento empírico.

2.1.3 Desgaste

O atrito e o desgaste estão diretamente relacionados, embora o objetivo da lubrificação seja reduzir o atrito, com a redução do atrito haverá redução do desgaste, por isso a tribologia envolve essas três áreas (RADI, 2007).

Segundo Carreteiro (1998), todos os corpos sofrem a ação do desgaste com o decorrer do tempo. Como por exemplo a exposição de um metal como o ferro ao ar livre, ocorrerão interações atômicas entre o metal e o ar, fazendo com que o ferro oxide, ou como no caso de uma aeronave que sofre desgaste em altas velocidades por conta do arrasto, que nada mais é que o atrito da aeronave com o ar. Por meio de uma lubrificação adequada, objetiva-se minimizar o desgaste que pode se apresentar sob diversas formas.

Algumas formas de desgaste são: abrasão, corrosão, endentação, fricção, erosão, fragmentação, esfoliação, estriamento, cavitação e etc. (CARRETEIRO, 1998)

Existem três leis básicas de desgaste, segundo Carreteiro, são elas: a quantidade de desgaste D é proporcional à carga P; a quantidade de desgaste D é diretamente proporcional à distância deslizante, d.; a quantidade de desgaste D é inversamente proporcional à natureza da superfície, especificamente a dureza H, conforme as equações (4) e (5).

$$D \sim \frac{(P \times d)}{H} = \frac{Carg \times Distância}{Dureza} \quad (4)$$

Portanto:

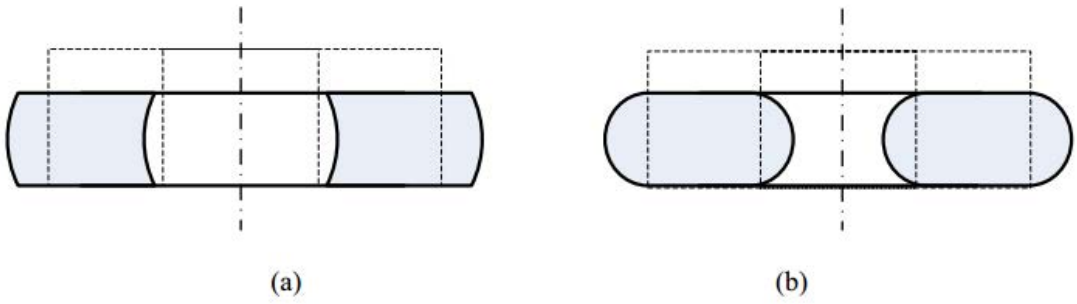
$$D = K \times \frac{(P \times d)}{H} \quad (5)$$

Sendo K, uma constante característica do sistema de deslizamento. (CARRETEIRO, 1998)

2.2 ENSAIO DE COMPRESSÃO DO ANEL

Segundo Hu (2015), este ensaio foi originado por Kunogi em 1956 como um método quantitativo de comparação entre lubrificantes para extrusão a frio. Sendo que nesse teste, uma amostra em forma de anel liso é comprimida por duas placas planas até que se chegue a 50% de redução de sua altura. No ensaio, se o lubrificante possuir uma boa propriedade de lubrificação e garantir um coeficiente de atrito muito baixo, o diâmetro interno do anel irá expandir durante a deformação. Porém, quando o coeficiente de atrito é alto, o diâmetro interno irá encolher como é possível verificar na Figura 6.

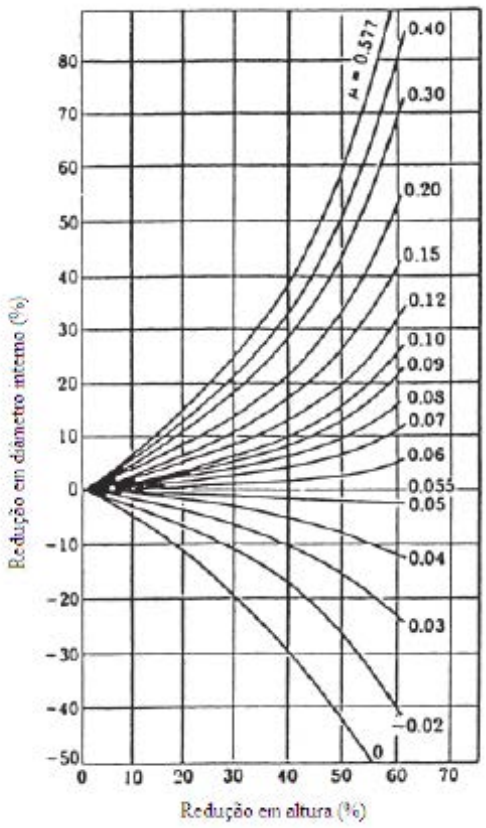
Figura 6: Ensaio de compressão do anel: (a) baixo atrito; (b) alto atrito



Fonte: (C. HU, 2015)

Anos mais tarde, entre 1964 e 1965, Male e Cockcroft desenvolveram o ensaio de compressão do anel através da introdução de um conjunto de curvas de calibração, observado no Gráfico 1, com a finalidade de determinar o coeficiente de atrito. No ensaio, para essa calibração funcionar, as amostras dos anéis possuíam as dimensões 6:3:2 (diâmetro externo, diâmetro interno, altura) e eram comprimidas sobre condição de zero atrito (HU, 2015).

Gráfico 1: Curvas de calibração desenvolvidas por Male para determinar o atrito



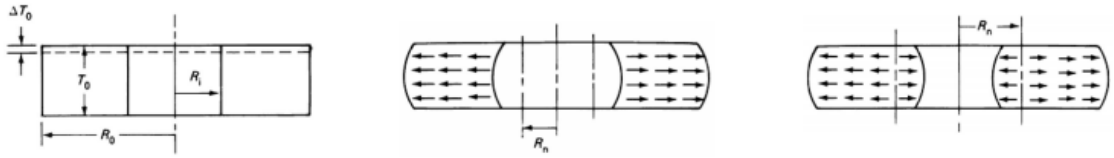
Fonte: (MALE E COCKCROFT,1964 apud BÖESCH, 2011)

Segundo Porr e Sinatora (2009), no período de deformação do anel, à medida que o material escorrega sobre as ferramentas (base superior e inferior em contato com o anel), as forças de atrito se opõem ao escoamento do material, do centro para as extremidades. Esta resistência se deve ao atrito gerado na região de contato entre as bases de compressão e o corpo de prova, enquanto que o metal na região média da espessura da amostra pode escoar na direção radial sem constrição. Este fato resulta em um corpo de prova deformado em forma de barril.

> No caso de uma condição de atrito suficientemente alta, a direção de escoamento do material mudará em certo ponto da secção transversal do anel, em consequência da mudança de direção da força de atrito atuante. Neste caso, o material apresenta uma linha neutra de escoamento, na qual o material não sofre escoamento radial. (PORR E SINATORA, 2009)

A linha neutra e os sentidos dos escoamentos do anel pode ser observado na Figura 7.

Figura 7: Corpo de prova para ensaio de compressão em diferentes situações (a) não-deformado (b) deformado em condição de baixo atrito (c) deformado em condição de alto atrito



a b c

Fonte: (PORR E SINATORA, 2009)

Segundo Border (2005) há dois tipos de medição para determinar o atrito: a medição direta e a indireta.

> Método de medição direta. O método de medição direta consiste em medir-se as tensões de cisalhamento de atrito (τi) e a tensão normal (σ) na superfície de contato entre o corpo de prova e as matrizes. Esta medição é feita através da medida de deformações com extensômetros. Este método possibilita o conhecimento direto das tensões (τi) e (σ) e do coeficiente de atrito em pontos específicos da matriz. Desta forma pode-se fazer uma avaliação do comportamento do coeficiente de atrito ao longo de uma superfície. Sua desvantagem está no grau de complexidade dos dispositivos e equipamentos exigidos. (BORDER, 2005, p. 19)

> Método de medição indireta. A medição indireta do atrito pode ser feita de várias formas e o emprego de um determinado método depende do conhecimento das variáveis do processo de forjamento, para que a escolha do método possa representar e simular as condições reais deste processo. Um método muito conhecido e aplicado para determinação do coeficiente de atrito, em condições de deformação plástica, é o método do anel, que consiste na deformação de corpos de prova em forma de anéis com superfícies planas e com medidas padronizadas. Submetendo-se este corpo de prova a uma carga, que leve o anel a uma dada redução de altura, teremos uma variação em seus diâmetros interno e externo (BORDER, 2005, p. 20)

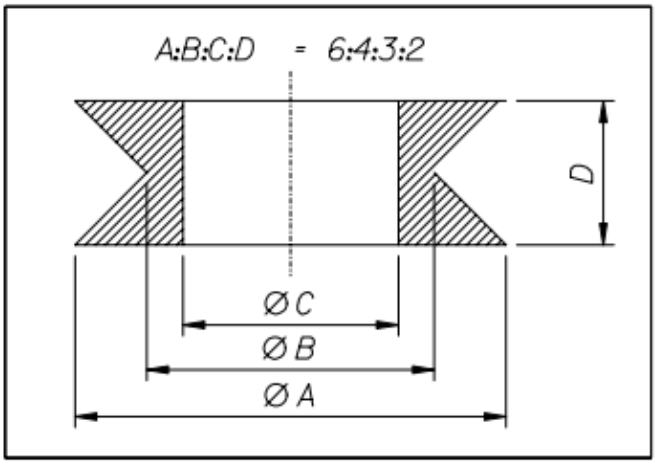
Para o caso de medição indireta do atrito, com base no pressuposto de deformação uniforme, bem como a conformidade da regra de Von Mises e com fator de cisalhamento constante, a primeira análise satisfatória da compressão de um anel liso foi feita por Avitzur (1964) através de um método de limite superior ótimo e depois verificado por Hawkyard e Johnson (1967), utilizando uma abordagem de análise de tensão, e a posição atual da superfície neutra, que dividem as regiões interior e exterior de fluxos de material. Ao dividir todo o processo de deformação em uma série de pequenos incrementos de deformação, Male e Depierre (1970) proporcionou um meio possível para a calibragem de diferentes geometrias do

anel por uma solução de computador. No entanto, o fator de atrito real obtido usando a teoria para analisar as mudanças de forma determinada experimentalmente produziu um valor superestimado. Para minimizar a discrepância entre os resultados teóricos e experimentais, o efeito de abaulamento causada pela deformação não uniforme deveria ser considerado ainda mais. Utilizando apenas uma curva parabólica simples, com apenas um coeficiente incerto para representar o perfil do abaulamento, Liu (1972) calculou teoricamente os componentes de tensão e deformação na linha média da espessura do diâmetro externo e apresentou um conjunto de curvas de calibração para a razão 6: 3: 2 da geometria do anel. Com a introdução de um valor médio constante de tensão em cada etapa da pequena deformação relativa, Lee e Altan (1972) calcularam um outro conjunto de curvas de calibração considerando o abaulamento. E assim novos métodos para análise do atrito pelo ensaio de compressão do anel foram desenvolvidos (HU, 2015).

Este método é muito utilizado devido à sua simplicidade, pois ele não depende da variável de força aplicada para compressão do anel nem da tensão de escoamento do material do objeto ensaiado segundo Male (apud SILVESTRE, 2013), por isso este método é muito utilizado para a avaliação de lubrificantes, sendo que no caso deste estudo, o tipo de material do corpo de prova não influirá no resultado.

Graças a evolução tecnológica dos programas de simulação, utilizando métodos de elementos finitos, facilitou o desenvolvimento novos métodos de realizar o ensaio de compressão do anel para determinadas situações, com resultados mais precisos quando comparado o resultado teórico com o experimental, conforme a Figura 8:

Figura 8: Geometria proposta para calibração do modelo de atrito em condições de baixos níveis de pressão normal



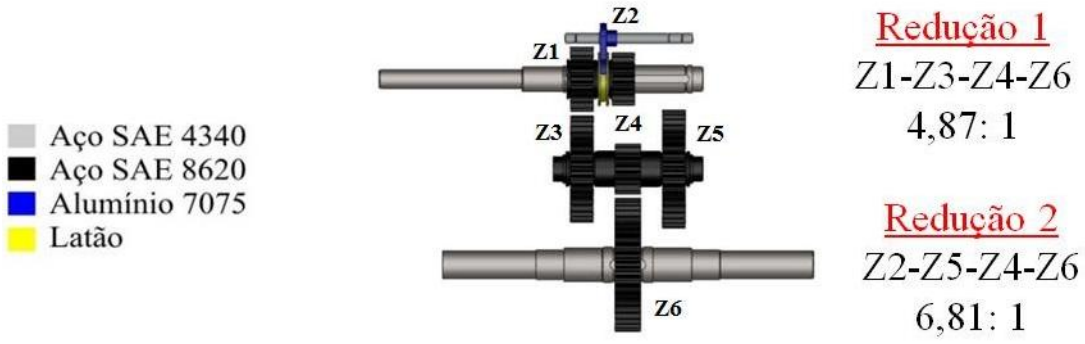
Fonte: (BORDER, 2005)

Pelo método do anel ser inicialmente desenvolvido para a extrusão à frio, que é um método de conformação onde há uma condição de atrito muito elevada, a avaliação dos lubrificantes será extrapolada para condições de atrito mais simples, como por exemplo componentes mecânicos em contato e movimento relativo contínuo, como é o caso da caixa de transmissão e caixa de direção.

2.3 CAIXA DE TRANSMISSÃO

As Figuras 9, 10 e 11 são exemplos de uma caixa de transmissão simples, que é utilizada em um dos projetos estudantis da UNESP/FEG.

Figura 9: elementos de uma caixa de transmissão



Fonte: (EQUIPE PIRATAS DO VALE, 2015)

Figura 10: Visão expandida do conjunto motor e transmissão

Fonte: (EQUIPE PIRATAS DO VALE, 2015)

Figura 11: Caixa de transmissão utilizada pelo veículo Baja SAE da UNESP/FEG

Fonte: autoria própria

Segundo Garcia (2013), a transmissão, parte do *powertrain*, é o componente responsável por transferir e escalonar o torque do motor através de suas marchas de velocidades, projetadas para atender à uma relação de capacidade de rampa, velocidade final. Onde a perda de energia pode chegar a aproximadamente 5%, levando-se em conta as transmissões de movimentos para os eixos traseiros.

As caixas de marcha são constituídas por árvores de engrenagens que formam os chamados trens de engrenagens. Os quais são amplamente empregados em máquinas e veículos, responsáveis pelo estabelecimento das relações de entrada e saída da rotação e do torque no sistema. (LEITE, 2012)

As diferentes opções de relações de transmissão permitem que o motor opere dentro da faixa ótima de rotação, o que gera redução de consumo, no caso de motores a combustão interna.

Segundo Garcia (2013) a tribologia na caixa de transmissão vem a ser muito influente no desempenho e na sua vida útil, devido ao fato de que as principais perdas mecânicas são devido ao atrito.

2.3.1 Materiais usualmente utilizados na caixa de transmissão

2.3.1.1 Aço SAE 4340 – (Eixos)

O aço SAE 4340 atualmente é utilizado para a confecção dos eixos das engrenagens da caixa de transmissão.

Segundo Chiaverini (1996), a classificação SAE para aços é baseada na composição química do mesmo. Sendo essa classificação adotada também pela AISI. Os aços SAE 4XXX (UNS G4XXXX) são chamados de Aço-Molibdênio.

Segundo a Gerdau (2015) os dois primeiros dígitos de sua nomenclatura (43), significam que é um aço com composição química média de: 0,25 % de Mo, 0,80 % de Cr e 1,82% de Ni. Já os dois últimos dígitos de sua nomenclatura (40), indicam que esse aço possui 0,40% de C em sua composição.

Sua faixa de tolerância em sua composição química é verificada na Tabela 1:

Tabela 1: composição química do Aço SAE 4340

Elemento	Composição (%)
Ferro, Fe	95.195 - 96.33
Níquel, Ni	1.65 - 2.00
Cromo, Cr	0.700 - 0.900
Manganês, Mn	0.600 - 0.800
Carbono, C	0.370 - 0.430
Molibdênio, Mo	0.200 - 0.300
Silício, Si	0.150 - 0.300
Enxofre, S	0.0400
Fósforo, P	0.0350

Fonte: (AZOM, 2015)

Já as demais propriedades do aço SAE 4340, como as suas propriedades físicas e térmicas podem ser conferidas nas Tabelas 2 e 3 respectivamente. O mesmo aço SAE

4340 pode receber designações diferentes em outros países, as mais conhecidas são mencionadas na Tabela 5.

Tabela 2: propriedades físicas do aço SAE 4340

Propriedades	
Densidade	7.85 g/cm³
Ponto de fusão	1427°C

Fonte: (AZOM, 2015)

Tabela 3: propriedades térmicas do aço SAE 4340

Propriedades	
Coeficiente de expansão térmica	12.3 µm/m°C
Condutividade térmica	44.5 W/mK

Fonte: (AZOM, 2015)

Tabela 4: outras designações do aço SAE 4340

AMS 6359	AMS 6454	ASTM A331 (4340)	ASTM A711	SAE J1397 (4340)
AMS 6409	ASTM A29 (4340)	ASTM A506 (4340)	ASTM A752 (4340)	SAE J404 (4340)
AMS 6414	ASTM A320 (L43)	ASTM A519 (4340)	ASTM A829	SAE J412 (4340)
AMS 6415	ASTM A322 (4340)	ASTM A646 (4340-7)	MIL S-5000	

Fonte: (AZOM, 2015)

Ainda segundo a Gerdau (2015) este tipo de aço é muito utilizado para construção mecânica como na fabricação de virabrequins para aviões, tratores, veículos em geral. engrenagens, componentes com boas propriedades mecânicas e eixos muito solicitados.

2.3.1.2 Aço 8620 – (Engrenagens)

Segundo Chiaverini (1996) os aços SAE 86XX (UNS G86XXX) são chamados de aço-níquel-cromo-molibdênio. Os dois primeiros dígitos da nomenclatura (86), significam que é um aço com composição química média de 0,20 % de Mo, 0,50 % de Cr e 0,55 % de Ni. Já os dois

últimos dígitos de sua nomenclatura (20), indicam que esse aço possui 0,20% de C em sua composição.

Sua faixa de tolerância em sua composição química é verificada na Tabela 5:

Tabela 5: composição química do aço SAE 8620

Elemento	Composição (%)
Ferro, Fe	96.895-98.02
Manganês, Mn	0.700-0.900
Níquel, Ni	0.400-0.700
Cromo, Cr	0.400-0.600
Carbono, C	0.180-0.230
Silício, Si	0.150-0.350
Molibdênio, Mo	0.150-0.250
Enxofre, S	≤ 0.0400
Fósforo, P	≤ 0.0350

Fonte: (AZOM, 2015)

Já as demais propriedades do aço SAE 8620, como as suas propriedades físicas e térmicas podem ser conferidas nas Tabelas 6 e 7 respectivamente. O mesmo aço SAE 8620 pode receber designações diferentes em outros países, as mais conhecidas são mencionadas na Tabela 8.

Tabela 6: propriedade física do aço SAE 8620

Propriedades	
Densidade	7.85 g/cm³

Fonte: (AZOM, 2015)

Tabela 7: propriedade térmica do aço SAE 8620

Propriedades	
Condutividade térmica	46.6 W/mK

Fonte: (AZOM, 2015)

Tabela 8: outras designações do aço SAE 8620

AISI 8620	AMS 6274	AMS 6276	AMS 6277	AMS 6375	ASTM A29
ASTM A322	ASTM A331	ASTM A506	ASTM A507	ASTM A513	ASTM A519
ASTM A646	ASTM A752	ASTM A829	MIL S-8690	SAE J1397	SAE J404
AFNOR 20 NCD 2	AFNOR 22 NCD 2	DIN 1.6523	UNI 20 NiCrMo 2	JIS SNCM 21	JIS SNCM 21 H
B.S. 805 H 20	B.S. 805 M 20	AMS 6274G	AMS 6276C	AMS 6277A	ASTM A505
MIL SPEC MIL-S-16974	SAE J404	SAE J770			

Fonte: (AZOM, 2015)

Segundo a Gerdau (2015) este tipo de aço é muito utilizado nos casos em que se necessita de endurecimento superficial por cementação e carbonitretação.

Como exemplos de utilização do aço SAE 8620 temos eixos de comando, elementos de fixação, engrenagens, correntes e pinos de corrente. (AZOM, 2015)

2.3.1.3 Alumínio 7075 – (Garfo seletor de relação e caixa da transmissão)

Segundo Azom (2015) o alumínio 7075 é uma liga composta basicamente de Alumínio e Zinco. Sendo sua composição química conforme a Tabela 9:

Tabela 9: composição química do Alumínio 7075

Elemento	Composição(%)
Alumínio, Al	90
Zinco, Zn	5.6
Magnésio, Mg	2.5
Cobre, Cu	1.6
Cromo, Cr	0.23

Fonte: (AZOM, 2015)

Já as demais propriedades do Alumínio 7075, como as suas propriedades físicas e térmicas podem ser conferidas nas Tabelas 10 e 11 respectivamente. O mesmo Alumínio 7075 pode receber designações diferentes em outros países, as mais conhecidas são mencionadas na Tabela 12.

Tabela 10: propriedades físicas do Alumínio 7075

Propriedades	
Densidade	2.8 g/cm^3
Ponto de fusão	483°C

Fonte: (AZOM, 2015)

Tabela 11: propriedades térmicas do Alumínio 7075

Propriedades		Condições	
		T (ºC)	Tratamento
Expansão térmica	23.2 (10^{-6}/ºC)	20-100	-
Condutividade térmica	130 W/mK	25	T6

Fonte: (AZOM, 2015)

Tabela 12: outras designações do Alumínio 7075

AMS 4044	ASTM B209	ASTM B468	QQ A-200/15
AMS 4045	ASTM B210	DMS 2233	QQ A-225/9
AMS 4049	ASTM B211	MIL A-12545	QQ A-250/13
AMS 4131	ASTM B221	MIL A-22771	QQ A-250/24
AMS 4147	ASTM B241	MIL F-18280	QQ A-367
AMS 4154	ASTM B247	MIL F-5509	QQ A-430
AMS 4323	ASTM B316	QQ A-200/11	QQ WW-T-700/7
SAE J454			

Fonte: (AZOM, 2015)

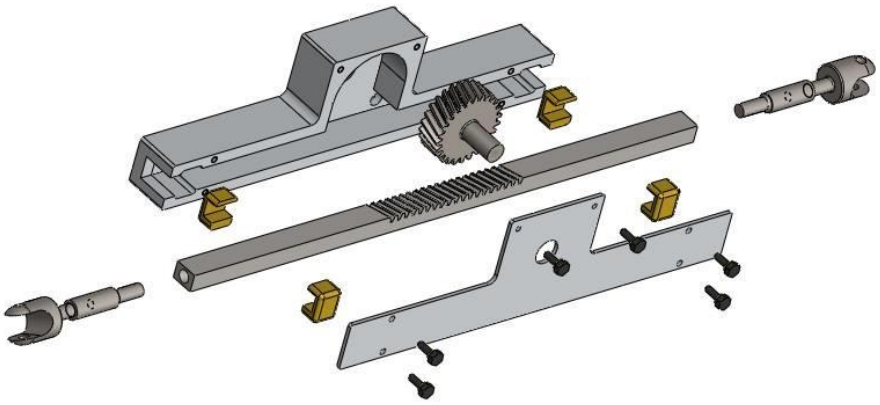
Segundo Azom (2015) a liga de Alumínio 7075 possui elevada resistência mecânica e baixo peso, muito utilizado nos meios de transportes. Amplamente aplicado na fabricação de aeronaves e desejáveis também em outras áreas.

2.4 CAIXA DE DIREÇÃO AUTOMOTIVA - PINHÃO/CREMALHEIRA

Segundo Cruz (2006) o mecanismo de caixa de direção hidráulica do tipo pinhão/cremalheira é um conjunto cuja a função é direcionar o veículo de acordo com o comando do motorista. De modo que o projeto de todo o sistema de direção resulta diretamente na dirigibilidade do veículo. O uso da direção hidráulica surgiu da necessidade de realizar um menor esforço para girar o volante em manobras que exigem maior força mecânica, como no caso de esterçamento com o veículo parado em situações de estacionamento.

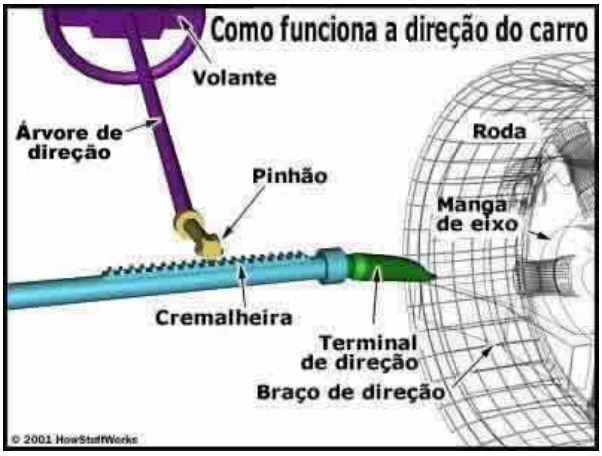
Na Figura 12, é possível observar um exemplo de uma caixa de direção do tipo pinha/cremalheira, recentemente utilizada em um dos projetos estudantis da FEG.

Figura 12: visão explodida da caixa de direção utilizada pelo veículo Baja da UNESP/FEG



Fonte: (EQUIPE PIRATAS DO VALE, 2015)

Figura 13: Sistema pinhão/cremalheira



Fonte: (HOWSTUFFWORKS, 2001)

O funcionamento do sistema de direção é exemplificado na Figura 13.

> A assistência hidráulica transferida do volante de direção para as rodas é obtida pela interação de componentes hidráulicos e ligações mecânicas. O sistema de assistência hidráulica consiste de uma válvula rotativa de centro aberto que direciona o fluido hidráulico fornecido por uma bomba para um dos lados do êmbolo do pistão montado na cremalheira. Esse processo converte a pressão hidráulica em força que movimenta a cremalheira para a esquerda ou para a direita e 16 estes movimentos são transmitidos, através de um sistema articulado ("*inner e outer joints*"), para os braços de direção promovendo o giro das rodas. (CRUZ, 2006)

Os materiais utilizados em uma caixa de direção do veículo Baja SAE da UNESP/FEG são:

-Aço SAE 4340 para a confecção da cremalheira e do pinhão;

-Alumínio 7075 para a confecção da caixa externa;

-Bronze para a confecção das buchas da cremalheira.

Para a lubrificação dos componentes da caixa de direção, o lubrificante utilizado é a graxa para casos de direção mecânica ou óleo para direção hidráulica.

2.5 RUGOSIDADE

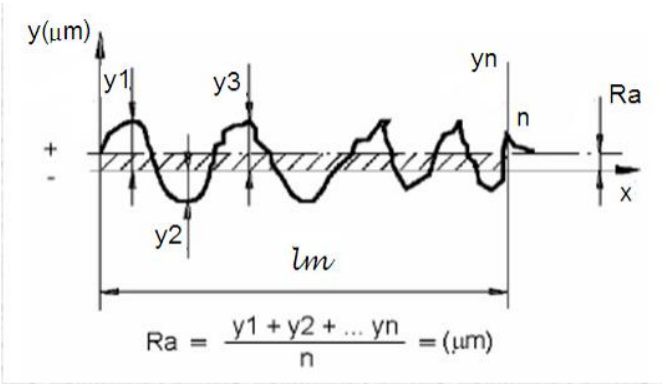
Segundo Piratelli Filho (2011), a rugosidade é o conjunto de desvios microgeométricos, que são caracterizados devido as pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. Mesmo quando observadas em detalhes, estas irregularidades usualmente são geradas por sulcos ou por marcas ocasionadas pela ferramenta de corte utilizado sobre a superfície da peça.

Segundo Parra (2006) o desgaste por abrasão superficial é maior em superfícies de alta rugosidade. As saliências existentes nas superfícies formam cantos vivos, estes se soltam com maior facilidade quando a superfície é submetida a este tipo de desgaste. Assim as depressões agem como núcleos de retenção de resíduos na superfície do material.

Para a medição de desvios microgeométricos, há somente instrumentos especiais como rugosímetros e perfilógrafos, porém perfilógrafos são utilizados mais usualmente na construção civil em pavimentos urbanos. Existem basicamente dois sistemas de medição de rugosidade: o sistema M de linha média e o sistema E de linhas envoltórias. O sistema M determina a linha média que divide as áreas do perfil de rugosidade, sendo este sistema o mais utilizado no Brasil. Já o sistema E, as linhas envoltórias são determinadas por dois círculos que rolam sobre a superfície da peça. Existem ainda 3 tipos de parâmetros que podem ser determinados: de amplitude, de espaçamento e híbrido (PIRATELLI FILHO, 2011).

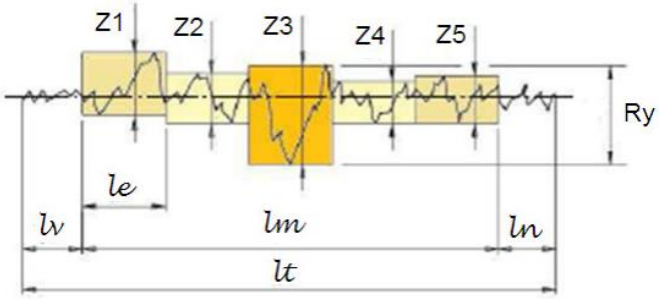
No parâmetro de amplitude, existem 3 tipos principais de medições realizadas, o Ra que mede a rugosidade média das amplitudes em função da linha média (Figura 14); o Rt que mede a rugosidade máxima das amplitudes no percurso de medição da linha média (Figura 15); e o Rz que mede a amplitude do pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento da linha média. Dentre eles o mais utilizado é o Ra por ser aplicável à maior parte dos processos de fabricação e pela maioria dos equipamentos de medição apresentarem este parâmetro (PIRATELLI FILHO, 2011).

Figura 14: método de medição de rugosidade Ra



Fonte: (PIRATELLI FILHO, 2011)

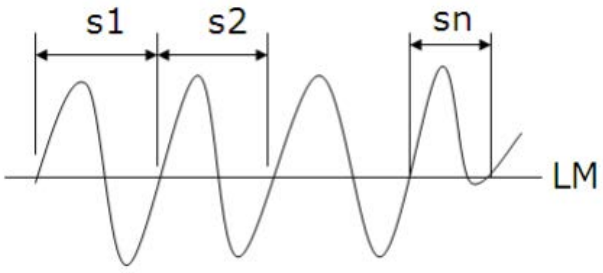
Figura 15: método de medição de rugosidade Rt



Fonte: (PIRATELLI FILHO, 2011)

No parâmetro de espaçamento existe a medição Rsm que mede a largura média dos espaçamentos da rugosidade em função da linha média (lm), como pode-se observar na Figura 16.

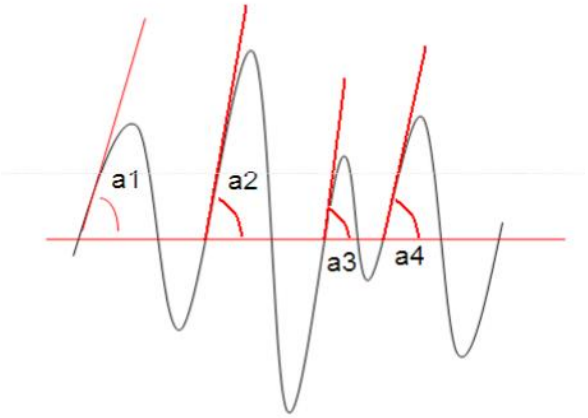
Figura 16: método de medição de rugosdade Rsm



Fonte: (PIRATELLI FILHO, 2011)

No parâmetro híbrido há a medição RΔq que mede a inclinação média quadrática do perfil como pode ser observado na Figura 17.

Figura 17: método de medição de rugosidade RΔq



Fonte: (PIRATELLI FILHO, 2011)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A preparação dos corpos de prova, os ensaios de compressão do anel e as medições foram realizados nas dependências do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP/FEG.

Os equipamentos utilizados para a preparação e ensaio dos corpos de prova e ensaio foram:

- Máquina universal de ensaios mecânicos, para realização do ensaio de compressão do anel, conforme Figura 18:

Figura 18: máquina universal de ensaios Mohr e Federhaff

Fonte: autoria própria

- Torno mecânico para usinagem dos diâmetros interno e externo dos corpos de prova, conforme Figura 19:

Figura 19: Torno HBX IMOR

Fonte: autoria própria

- Máquina de corte por eletroerosão a fio, para a confecção das amostras com a espessura desejada, conforme Figura 20:

Figura 20: Eletroerosão CNC de corte a fio Agie Charmilles

Fonte: autoria própria

- Máquina de polir, utilizada para fazer o polimento de metade das amostras com lixa 600, conforme Figura 21:

Figura 21: máquina de polir Knuth Rotor

Fonte: autoria própria

- Rugosímetro, para a medição da rugosidade tanto da superfície polida quanto a não polida, conforme Figura 22:

Figura 22: Rugosímetro Marsurf M300

Fonte: autoria própria

- Paquímetro Digital, utilizado para realização das dimensões dos anéis, conforme Figura 23:

Figura 23: paquímetro digital Mitutoyo

Fonte: autoria própria

- Projetor de perfil, utilizado para medição dos diâmetros internos dos corpos de prova após o ensaio de compressão do anel, conforme Figura 24:

Figura 24: projetor de perfil MP 320 Carl Zeiss

Fonte: autoria própria

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para os ensaios de compressão do anel foram:

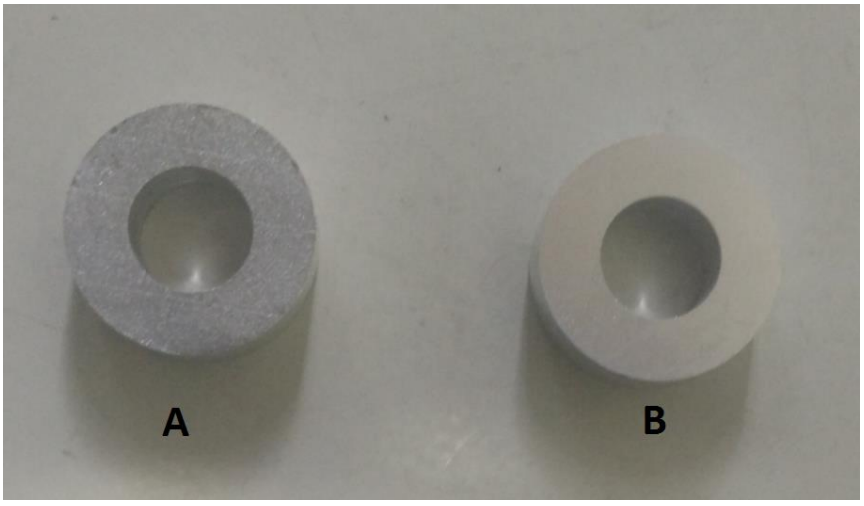
(a) – Lubrificante A- TRM-4;
(b) – Lubrificante B- Dexron VI;
(c) – Lubrificante C- Dexron III;
(d) – Lubrificante D- Graxa Azul de Lítio;
(e) – Lubrificante E- Graxa Branca de Lítio;
(f) – Corpos de prova (anéis) de Alumínio Comercial.

Foram utilizadas seis amostras de anéis para cada tipo de lubrificante (lubrificantes A, B, C, D e E, totalizando trinta amostras), nas dimensões 18:9:6 mm (diâmetro externo, diâmetro interno, altura). Das seis amostras, três com uma rugosidade e três com outra, conforme pode-se observar na Figura 25, com a finalidade de se obter um resultado mais confiável. Para a compressão foi utilizado a base plana da própria máquina de compressão, não sendo uma variável.

Para a lubrificação, foi utilizado os lubrificantes A, B, C, D e E, com uma fina camada entre as áreas planas de contato entre o anel e as bases matrizes do equipamento.

As amostras estavam padronizadas conforme descrito pelo ensaio de Male, na razão 6:3:2 (diâmetro externo, diâmetro interno, espessura).

Figura 25: A- corpo de prova não polido; B- corpo de prova polido com lixa 600



Fonte: autoria própria

3.1.1 Lubrificante A (Óleo Lubrax TRM-4 grau 90)

Segundo a fabricante BR (2015), o óleo Lubrax TRM-4 é um "Óleo lubrificante, sendo este formulado a partir de óleos minerais de petróleo do tipo parafínico, devidamente refinados, compostos de hidrocarbonetos dos tipos alcanos e cicloalcanos, com teores menores de hidrocarbonetos aromáticos; e com aditivação específica para atendimento das características de desempenho. "

"LUBRAX TRM 4 SAE 90 é qualificado pela norma da fabricante ZF, empresa de sistemas de transmissão tanto automotiva quanto de embarcações, para uso em transmissões de acordo com as normas ZF TE-ML 02B, 16A, 17A e 19A, quanto para uso em caixas de mudança manuais de caminhões e de ônibus VOLVO. " (BR, 2015)

Ainda segundo a BR (2015), as recomendações de uso são para engrenagens hipóides que exijam lubrificante com nível de desempenho API GL-4. A Categoria API GL-4 designa o trabalho característico de espirais-cônicas e engrenagens hipóides em eixos automotivos que operaram sob velocidades e cargas de serviço moderadas.

Suas propriedades segundo a fabricante:

Densidade @ 4ºC: 0,8945;
Ponto e Fulgor (V/A): 242 ºC;
Ponto de Fluidez: -18 ºC;
Viscosidade @ 40ºC: 162,9 cSt;
Viscosidade @ 100ºC: 15,5 cSt;
Índice de viscosidade: 96.

3.1.2 Lubrificante B (Óleo Valvoline Dexron VI)

Segundo a fabricante (Valvoline), o lubrificante Valvoline Dexron VI ATF (fluido de transmissão automática) é "formulado com óleos de base sintética de alta qualidade e aditivos de avançada tecnologia, e atende todos os requisitos rigorosos da especificação DEXRON General Motors ®-VI , que é projetado para as modernas transmissões automáticas dos veículos GM. Valvoline DEXRON ®-VI ATF é oficialmente licenciada com GM e pode ser usado em novas e antigas transmissões automáticas GM onde DEXRON ®-II e / ou III-DEXRON ® são recomendados".

Suas vantagens, segundo a Valvoline: proporcionamento de desempenho consistente de mudança para as transmissões GM novos e antigos; aumenta a vida útil do fluido da transmissão e previne quebra fluido a temperaturas de operação mais altas; proporciona excelente estabilidade oxidativa sob condições severas; reduz o iodo e verniz; faz a proteção de engrenagens de transmissão e permite que eles funcionem sem problemas; mantém a ubricidade.

Características DEXRON VI:

Viscosidade Cinemática a 100°C: 6,0 cSt;
Viscosidade Cinemática 40°C: 29,5 cSt;
Índice de Viscosidade: 155;
Ponto de Fluidez: -48 ºC;
CCS a -30ºC: 2900 cP;
Densidade a 60°F: 0,848;
Ponto de Fulgor, COC: Mín.200°C;
Cor ASTM: 7.0;
Aparência: Límpido / Vermelho.

Seu nível de performance excede os requerimentos Dexron III, Dexron II.

Adequado para uso em: novas transmissões GM e também nas antigas transmissões onde requerem Dexron III e Dexron II.

3.1.3 Lubrificante C (Óleo Valvoline Dexron III)

Segundo a fabricante Valvoline (2015), o lubrificante Valvoline ATF Dexron III (fluido de transmissão automática) é " um lubrificante formulado com óleos básicos premium e com avançada tecnologia de aditivos para atender os desafios que exigem o ambiente de trabalho de uma transmissão automática. Sua excelente resposta de fluidez em baixas temperaturas é benéfica tanto para transmissões controladas eletronicamente quanto por sistemas hidráulicos. ".

Suas vantagens, ainda segundo a fabricante: proteção das peças do sistema de transmissão em baixa temperatura; é um lubrificante modificador de atrito que visa proteger os componentes do sistema de transmissão inclusive os selos e vedações; e minimiza a formação de borra e verniz.

Características DEXRON III segundo a fabricante:

Viscosidade Cinemática a 100°C: 7,4 cSt;

Viscosidade Cinemática 40°C: 32,5 cSt;
Índice de Viscosidade: 205;
Ponto de Fluidez: -48 ºC;
Viscosidade Brookfield, a -40ºC: 17.500 cP;
Densidade a 60°F: 0,864;
Ponto de Fulgor, COC: 190°C;
Cor ASTM: 7.0;
Aparência: Límpido / Vermelho.

Segundo a fabricante, sua utilização é recomendada para transmissões automáticas que requerem o nível de performance Dexron®III, Mercon e Allison C4.

3.1.4 Lubrificante D (Graxa Azul de Lítio)

Segundo a fabricante (Graxax), é uma graxa azul a base de lítio que contém lubrificantes sólidos e espessantes. Foi desenvolvida para lubrificação em regime de altas cargas e agente químicos. Suas principais aplicações são: rolamentos, engrenagens, válvulas, bombas imersas, flanges e geradores elétricos. Possui baixa tendência de resinificação e formar resíduos, o que estende sua relubrificação por um longo período.

Suas principais características segundo a Graxax são:

- Aparência: Pasta na cor azul;
- Consistência: NLGI 2;
- Temperatura de trabalho: -15ºC até +135ºC;
- Penetração trabalhada: 265-295 mm;
- Validade: produto não perecível;
- Não tóxico.

3.1.5 Lubrificante E (Graxa Branca de Lítio)

Segundo a fabricante (Graxax), é uma graxa branca composta por sabão de lítio, óleos minerais, aditivos, agentes protetivos, anticorrosivos e antioxidantes. Foi desenvolvida para lubrificação em regime severo de umidade, sendo indicado para aplicações em rolamentos de alta e baixa rotação, roletes, mancais, correntes em geral, barcos, autos, ferramentas elétricas.

Suas principais características são:

- Aparência: Pasta na cor branca;
- Consistência: NLGI 2;
- Temperatura de trabalho: -15ºC até +150ºC;
- Penetração trabalhada: 265-295 mm;

- Ponto de gota: 187ºC – 193ºC;
- Validade: produto não perecível;
- Não tóxico.

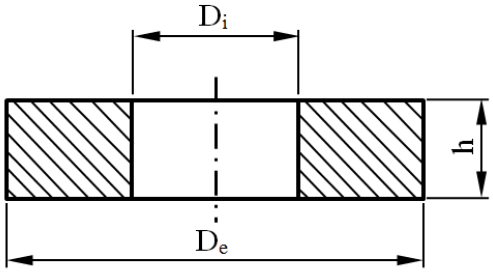
3.2 MÉTODOS

Para avaliação dos lubrificantes, será divido em dois grupos, óleos e graxas, apenas comparado os lubrificantes do mesmo tipo, graxa com graxa e óleo com óleo.

3.2.1 Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova foi feita pelo técnico do laboratório de usinagem com a utilização do torno e da máquina de corte por eletroerosão a fio para se obter as dimensões desejadas. As dimensões desejadas respeitaram a razão 6:3:2 (De:Di:h conforme a Figura 26)

Figura 26: exemplo do anel utilizado no ensaio



Fonte: autoria própria

Após a usinagem dos corpos de prova, foi feito o polimento superficial de metade das amostras (quinze) em lixa 600 na máquina de polir do laboratório de Materialografia da faculdade, tanto na superfície plana superior como inferior do anel.

Posteriormente, com a utilização do rugosímetro, foram realizadas as medições das rugosidades dos dois tipos de superfície, a polida e a não polida.

3.2.2 Ensaio de compressão do anel

No ensaio de compressão do anel, realizado na máquina de ensaio universal, aplicou-se uma camada de lubrificante suficiente para preencher toda a superfície superior e inferior do anel, e foi aplicado uma carga axial de compressão em cada amostra para que esta se deformasse e obtivesse a redução de espessura próxima de 50%. Sendo que segundo Boesch (2011), o valor

da carga axial não possui relevância para a comparação, necessitando apenas as variações percentuais das medidas do diâmetro interno das amostras.

3.2.3 Medições das rugosidades e dos diâmetros interno dos corpos de prova após os ensaios

Após a confecção dos corpos de prova e o polimento de metade das unidades, foram medidas as rugosidades das amostras polidas e não polidas através do rugosímetro, utilizando cinco diferentes amostras polidas e cinco diferentes amostras não polidas.

As rugosidades das superfícies do dispositivo de compressão axial não foram medidas pois não são variáveis, já que para todos os ensaios de compressão, foram utilizadas as mesmas bases do equipamento.

Após realizados os testes em todas as amostras, foram feitas as medições dos diâmetros internos através de um projetor de perfil do laboratório de metrologia da faculdade, utilizando a projeção diascópica. Foram realizadas três medições do diâmetro interno (Di) de cada amostra, sendo rotacionada em 120 graus a cada nova medida.

Para as medições das espessuras (h), foi utilizado um paquímetro digital.

3.2.4 Cálculo das porcentagens de redução

Após realizada as medições dos diâmetros internos e das espessuras de cada corpo de prova ensaiado, o cálculo de porcentagem de redução será feito conforme a equação 6 e 7:

$$Redução\ do\ diâmetro\ interno = \frac{Dii - Dif}{Dif} \times 100\% \qquad (6);$$

Com Dii sendo o diâmetro interno inicial (9mm) e Dif o diâmetro interno final médio da amostra após o ensaio de compressão.

$$Redução\ percentual\ da\ espessura = \frac{hi - hf}{hi} \times 100\% \qquad (7);$$

Com hi sendo a espessura inicial (6mm) e hf a espessura final média da amostra após o ensaio de compressão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os corpos de prova após serem ensaiados, foram enumerados conforme a Figura 23 para a realização das medições.

Numeração dos corpos de prova, conforme Figura 27:

1, 2, 3: amostras polidas, ensaiadas com o Lubrificante A;

4, 5, 6: amostras não polidas, ensaiadas com o Lubrificante A;

7, 8, 9: amostras polidas, ensaiadas com o Lubrificante B;

10, 11, 12: amostras não polidas, ensaiadas com o Lubrificante B;

13, 14 ,15: amostras polidas, ensaiadas com o Lubrificante C;

16, 17 ,18: amostras não polidas, ensaiadas com o Lubrificante C;

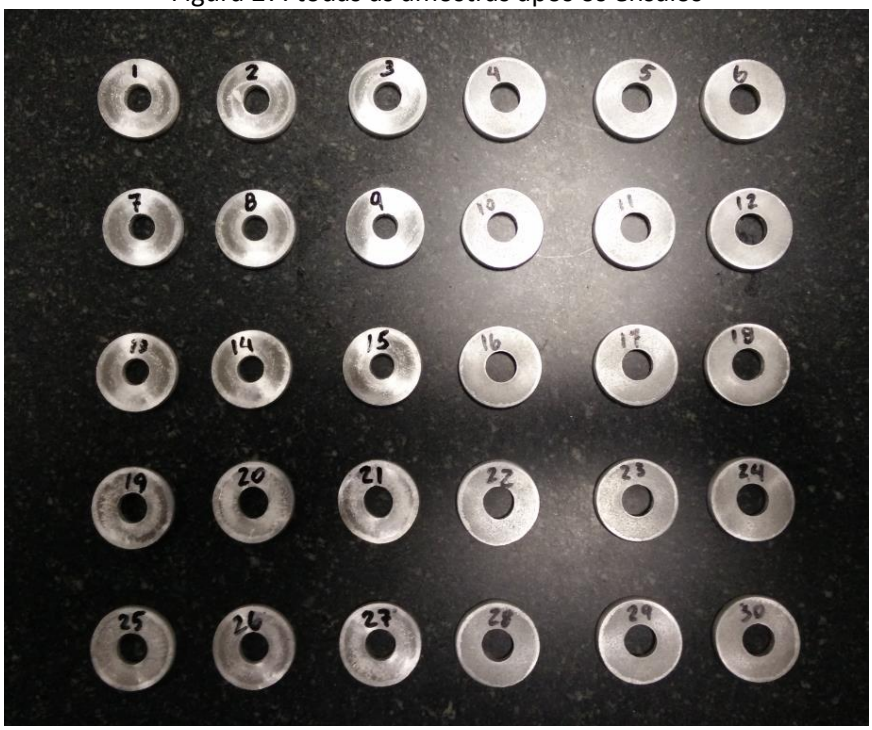
19, 20, 21: amostras polidas, ensaiadas com o Lubrificante D;

22, 23, 24: amostras não polidas, ensaiadas com o Lubrificante D;

25, 26, 27: amostras polidas, ensaiadas com o Lubrificante E;

28, 29, 30: amostras não polidas, ensaiadas com o Lubrificante E;

Figura 27: todas as amostras após os ensaios



Fonte: autoria própria

4.1 DIMENSÕES OBTIDAS

4.1.1 Rugosidade

Para as rugosidades, foi feita uma análise amostral, realizando medidas de cinco amostras, calculando sua média e seu desvio padrão para cada tipo de rugosidade, polido e não polido, conforme a Tabela 13:

Tabela 13: rugosidades dos corpos de prova.

Corpos de prova		
Amostras	Polidos	Não Polidos
	Rugosidade Ra (µm)	
1	0,418	5,136
2	0,221	6,192
3	0,264	5.916
4	0,209	5,373
5	0,209	4,833
Média	0,264	5,490
Desvio padrão amostral	0,0889	0,5579

Fonte: autoria própria

Esses níveis de rugosidade se mostraram conforme o esperado, onde há uma diferença significativa entre as rugosidades dos corpos de prova polidos e não polidos.

4.1.2 Tabelas de medidas e cálculos após os ensaios

As medidas obtidas e o resultado dos cálculos da redução do diâmetro interno e redução da espessura de cada amostra são observadas nas Tabelas 14 e 15:

Tabela 14: medidas dos diâmetros internos (Di) e espessuras (h) após os ensaios

	Amostra	Di1	Di2	Di3	Di médio		h1	h2	h3	h médio
TRM-4 Polido	1	7,101	7,449	7,503	7,351		3,23	3,23	3,24	3,23
	2	7,676	7,068	7,652	7,465		3,21	3,21	3,21	3,21
	3	7,761	7,987	7,529	7,759		3,28	3,30	3,28	3,29
TRM-4 Não Polido	4	8,647	8,775	8,476	8,633		3,10	3,10	3,1	3,10
	5	8,847	8,852	8,773	8,824		3,25	3,25	3,24	3,25
	6	8,799	8,810	8,723	8,777		3,25	3,25	3,25	3,25
Dexron VI Polido	7	6,660	6,462	6,420	6,514		3,27	3,29	3,29	3,28
	8	6,665	6,704	6,600	6,656		3,23	3,22	3,24	3,23
	9	6,429	6,363	6,276	6,356		3,23	3,22	3,24	3,23
Dexron VI Não Polido	10	8,660	8,508	8,609	8,592		3,25	3,22	3,25	3,24
	11	8,607	8,735	8,705	8,682		3,25	3,24	3,23	3,24
	12	8,868	8,930	8,805	8,868		3,21	3,21	3,21	3,21
Dexron III Polido	13	6,619	6,965	6,943	6,842		3,28	3,28	3,28	3,28
	14	6,722	7,086	6,838	6,882		3,31	3,29	3,29	3,30
	15	6,419	6,145	6,182	6,249		3,30	3,27	3,29	3,29
Dexron III Não Polido	16	8,529	8,578	8,656	8,588		3,19	3,22	3,21	3,21
	17	8,722	8,774	8,726	8,741		3,24	3,24	3,22	3,23
	18	8,650	8,804	8,667	8,707		3,25	3,25	3,21	3,24
Graxa Azul Polido	19	7,790	7,582	7,960	7,777		3,32	3,32	3,32	3,32
	20	8,449	8,177	8,101	8,242		3,26	3,26	3,24	3,25
	21	8,681	7,624	8,063	8,123		3,30	3,29	3,29	3,29
Graxa Azul Não Polido	22	8,986	8,709	8,743	8,813		3,26	3,25	3,27	3,26
	23	8,785	8,851	8,822	8,819		3,28	3,29	3,29	3,29
	24	8,744	8,902	8,805	8,817		3,26	3,26	3,27	3,26
Graxa Branca Polido	25	8,109	8,081	8,404	8,198		3,30	3,29	3,3	3,30
	26	7,868	7,913	7,628	7,803		3,27	3,27	3,27	3,27
	27	8,074	8,029	8,107	8,070		3,30	3,30	3,3	3,30
Graxa Branca Não Polido	28	9,035	8,697	8,766	8,833		3,25	3,25	3,25	3,25
	29	8,819	8,921	8,837	8,859		3,25	3,27	3,26	3,26
	30	8,747	8,814	8,687	8,749		3,25	3,26	3,24	3,25
Desvio Padrão Amostral:	Di--->	0,870458				h--->	0,041575			

Fonte: autoria própria

Tabela 15: redução em porcentagem dos diâmetros internos (Di) e espessuras (h) após os ensaios

	Amostra	Redução do diâmetro Interno	Redução da espessura h
TRM-4 Polido	1	18%	46%
	2	17%	47%
	3	14%	45%
TRM4 Não Polido	4	4%	48%
	5	2%	46%
	6	2%	46%
Dexron VI Polido	7	28%	45%
	8	26%	46%
	9	29%	46%
Dexron VI Não Polido	10	5%	46%
	11	4%	46%
	12	1%	47%
Dexron III Polido	13	24%	45%
	14	24%	45%
	15	31%	45%
Dexron III Não Polido	16	5%	47%
	17	3%	46%
	18	3%	46%
Graxa Azul Polido	19	14%	45%
	20	8%	46%
	21	10%	45%
Graxa Azul Não Polido	22	2%	46%
	23	2%	45%
	24	2%	46%
Graxa Branca Polido	25	9%	45%
	26	13%	46%
	27	10%	45%
Graxa Branca Não Polido	28	2%	46%
	29	2%	46%
	30	3%	46%

Fonte: autoria própria

Na Tabela 16 é possível verificar as reduções médias de cada lubrificante, com amostras polidas ou não polidas:

Tabela 16: avaliação comparativa dos lubrificantes através das reduções médias

Redução média				Valor do atrito obtido
				no gráfico de Male
Lubrificante	corpo de prova	Redução média dos Di	Redução média das espessuras	
TRM-4	polido	16%	46%	0,12
1, 2 e 3				
TRM-4	NÃO polido	3%	47%	0,065
4, 5 e 6				
Dexron 6	polido	28%	46%	0,197
7, 8 e 9				
Dexron 6	NÃO polido	3%	46%	0,067
10, 11 e12				
Dexron 3	polido	26%	45%	0,2
13, 14 e 15				
Dexron 3	NÃO polido	4%	46%	0,068
16, 17 e 18				
Graxa Azul	polido	11%	45%	0,093
19, 20 e21				
Graxa Azul	NÃO polido	2%	46%	0,06
22, 23 e 24				
Graxa Branca	polido	11%	45%	0,093
25, 26 e 27				
Graxa Branca	NÃO polido	2%	46%	0,06
28, 29 e 30				

Fonte: autoria própria

Através desses resultados foi possível levantar diversas questões sobre como varia o coeficiente de atrito com o nível de rugosidade das amostras no ensaio de compressão do anel, pois foi possível constatar que quanto menor a rugosidade, maior o atrito. Isto pode ter ocorrido pelo fato das forças de interações atômicas serem maiores do que as forças de cisalhamento entre o anel e as bases de compressão da máquina neste caso, porém é necessário um aprofundamento deste estudo para poder afirmar o porquê desse resultado. Lembrando que o foco deste estudo não é a obtenção do valor do atrito, mas sim a avaliação dos lubrificantes.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo avaliar lubrificantes quanto ao atrito, presente em aplicações mecânicas entre metais, para isso foi utilizado o ensaio de compressão do anel, onde a força exercida não é uma variável. Assim, as variáveis presentes nas análises foram: nível de rugosidade das superfícies planas inferior e superior dos corpos de prova, percentual de redução do diâmetro interno da amostra e o percentual de redução da espessura da amostra. O nível de rugosidade da superfície do equipamento de ensaio não foi uma variável pois foi utilizado as mesmas bases para a compressão de todos os corpos de prova.

Através deste experimento, com base nos resultados obtidos e cálculos realizados, foi possível concluir dentre as graxas, que os lubrificantes D (graxa azul) e E (graxa branca) obtiveram resultados muito semelhantes quanto ao atrito, tanto comparando os resultados com os corpos de provas polidos (μ= 0,093) e os não polidos (μ=0,06). Portanto, a escolha de uso entre eles deverá ser feita através de suas diferentes vantagens, como por exemplo a sua utilização em um meio com exposição a umidade ou não.

Na comparação entre os óleos lubrificantes, foi possível observar o melhor resultado do lubrificante A (TRM-4), e resultados próximos dos lubrificantes B (Dexron VI) e C (Dexron III) quanto ao nível de atrito, com uma ligeira vantagem do lubrificante B. Essa análise pôde ser observada nitidamente quando comparado os corpos de provas polidos (lubrificante A: μ= 0,120; Lubrificante B: μ= 0,197; Lubrificante C: μ= 0,200), já nos corpos não polidos, os resultados obtidos foram muito próximos (lubrificante A: μ= 0,065; Lubrificante B: μ= 0,067; Lubrificante C: μ= 0,068).

Assim sendo, é possível observar que há diferenças significativas na comparação entre ensaios com corpos de prova com diferentes rugosidades. Deste modo, para que a avaliação comparativa dos lubrificantes seja mais evidenciada conforme foi possível observar nos resultados obtidos, as rugosidades das superfícies superior e inferior de todas as amostras devem ser baixas e com valores parecidos, porém, para a avaliação dos lubrificantes, a rugosidade não influiu na ordem de classificação dos lubrificantes. Onde o lubrificante A (TRM-4) foi melhor que o B (Dexron VI), e o B ligeiramente melhor que o C (Dexron III) quanto às reduções do diâmetro interno e espessura do anel e consequentemente quanto ao atrito.

Porém, para poder extrapolar o uso do ensaio de compressão do anel para a determinação do atrito, que não foi o objetivo do presente estudo, para outras aplicações é necessário realizar

um estudo sobre diferentes formas de se obter o coeficiente de atrito e comparar se os resultados obtidos neste experimento serão os mesmos.

Portanto, é possível concluir que quanto menor a rugosidade, mais nítido é o resultado da avaliação comparativa do lubrificante pelo método do ensaio de compressão do anel.

No presente estudo foi possível observar também a deformação elástica do material, pois para os corpos de prova atingirem a redução de espessura desejada, foi utilizado como referência a amostra número 4 de 3,10 mm de espessura, e os resultados obtidos das espessuras das demais amostras foram todos acima de 3,21 mm.

Neste trabalho de graduação foi possível aplicar diversos tópicos aprendidos durante a graduação, como foi o caso da área de metrologia, materialografia, processos e tecnologia industrial, materiais de construção mecânica e usinagem.

Como sugestão para próximos estudos a respeito deste tema, recomenda-se avaliar outros tipos de lubrificantes, outros métodos de avaliação de lubrificantes e diversificar níveis de rugosidade para o ensaio de compressão do anel.

REFERÊNCIAS

ABAL. ***Ligas de Alumínio Trabalháveis.*** Disponível em < http://www.abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/ligas/ligas-de-aluminio-trabalhaveis/ >. Acessado em: 07 out. 2015.

AZOM. ***AISI 4340 Alloy Steel.*** Disponível em <http://www.azom.com/article.aspx?articleid=6772>. Acesso em: 29 set. 2015.

AZOM. ***AISI 8620 Alloy Steel.*** Disponível em <http://www.azom.com/article.aspx?articleid=6754>. Acesso em: 25 set. 2015.

AZOM. ***Aluminum 7075 Alloy***. Disponível em <http://www.azom.com/article.aspx?articleid=6652>. Acesso em: 11 set. 2015.

BORDER, Carlos. **Análise Do Coeficiente De Atrito No Ensaio Do Anel Para O Forjamento A Quente.** Trabalho de mestrado-USP. São Paulo, 2005.

BOZZA. ***History of Lubrication***. Disponível em: <http://www.bozza.com/en/institucional/historia>. Acessado em: 17 dez. 2015

BR. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos – FISPQ.** Disponível em <http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/ef11fd8043a7b20f926b9fecc2d0136c/fispq-lub-auto-trm-4-rev01.pdf?mod=ajperes >. Acessado em 17 out. 2015

BR. **Lubrax TRM 4.** Disponível em <http://www.br.com.br/wps/wcm/connect/f0572f0043a7b2d095fe9fecc2d0136c/ft-lub-auto-trm4.pdf?MOD=AJPERES>. Acessado em 15 dez. 2015

CARRETEIRO, Ronald P.; MOURA, Carlos. **Lubrificantes e Lubrificação**. São Paulo: Makron Books, 1998.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**, 7ª ed,1996.

CRUZ, José M. X. **Estudo De Caso De Ruído "Knock Noise" Em Mecanismos De Caixa De Direção Hidráulica Tipo Pinhão - Cremalheira**. São Paulo, 2006.

FILHO, Antonio P. **Rugosidade Superficial.** 3º Seminário de Metrologia. Brasília, 2011.

GARCIA, Marcos B.; MUSSATO, Carlos. **Confiabilidade e Tribologia Automotiva.** Disponível em:<http://pdf.blucher.com.br/engineeringproceedings/simea2013/PAP87.pdf>. Acessado em: 17 dez. 2015.

GERDAU. **Aços Para Construção Mecânica Gerdau – 4340**. Disponível em < https://www.gerdau.com/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/Gerdau%20-%204340.pdf >. Acesso em: 05 out. 2015.

GERDAU. **Aços Para Construção Mecânica Gerdau – 8620**. Disponível em <https://www.gerdau.com/pt/productsservices/products/document%20gallery/gerdau%20-%208620.pdf>. Acesso em: 05 out. 2015.

GINZBURG,Vladimir B**.** ***Metallurgical Design of Flat Rolled Steels.*** 2005.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. **Fundamentos de Física**, volume 1 : mecânica. 8.ed.Rio de Janeiro: LTC, 2008.

LEITE, Fernanda; TELES, José C.; FERREIRA, Douglas; LIMA, Israel; ANFLOR, Carla. **Estudo Do Funcionamento De Uma Caixa De Transmissão E Seus Componentes.** XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica. São Carlos, 2012.

PARRA, Bruno S.; GENNARI, Ronaldo C.; MELCHIADES, Fábio G.; BOSCHI, Anselmo O. **Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos.** Cerâmica Industrial. São Carlos, 2006.

PORR, Priscila; SINATORA, Amilton. **Estudo sobre a influência da carga de deformação e do coeficiente de atrito nas propriedades do aço 1020.** Trabalho de graduação-USP. São Paulo: 2009.

RADI, Polyana A; SANTOS, Lúcia V.; BONETTI, Luiz F; AIROLDI, Vladimir J. T. **Tribologia, Conceitos e Aplicações**. Anais do XIII ENCITA, ITA, 2007.

SCHEY, John A.; ***Tribology in Metalworking – Friction, Lubrication and Wear***. Ohio: Metals Park, 1984.

SILVA, A. L. V. C.; Mei, Paulo R. **Aços e Ligas Especiais**, 3ª ed, São Paulo: editora Blucher, 2010.

SILVESTRE, Marcus N., **Estudo Da Deformação Heterogênea No Ensaio Do Anel De Atrito.** Guaratinguetá: [s.n], 2013.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, Gene. **Física Para Cientistas e Engenheiros**, volume 1, 6ª Edição, LTC,2009.

TOTTEN, George E. ***Steel Heat Treatment***, 2ª ed. 2006.

VALVOLINE. **Informação do Produto.** Disponível em
< http://www.valvoline.com.br/imagens/Dexron%20III.pdf >. Acessado em: 16 dez. 2015.

VALVOLINE. **Informação do Produto.** Disponível em
<http://www.valvoline.com.br/imagens/dexron%20vi.pdf>. Acessado em: 13 dez. 2015.

ZHAO, zheng; HU, chengliang; OU, hengan. ***An Alternative Evaluation Method For Friction Condition In Cold Forging By Ring With Boss Compression Test***, volume 224, Journal of Materials Processing Technology, 2015.